アコースティック・エミッション —原波形とモーメントテンソル解析—

竹 本 幹 男*

Acoustic Emission —Source Wave and Moment Tensor Analyses

Mikio TAKEMOTO*

Key Words : Source Wave, Moment Tensor, Inverse Problem, Radiation Pattern

アコースティック・エミッション(AE)の中でも比較的新しい信号処理法である原波形解析, モーメントテンソル解析, 3次元放射パターン解析などの概要と応用例を紹介し, 従来型 AE法では解析できなかった震源の物理現象がかなりの精度で定量的に推定できることを報告する。

1. はじめに

アコースティック・エミッションと聞いて眉をひそめる方も多いと思う。筆者もかつてAEを手掛けたことがあり, ついこの前までは眉をひそめた方である。最近では, AEと呼ばないで弾性波(Elastic Wave, EW)と呼ぶことにしている。AEは, 古くて新しい非破壊検査法と呼ばれている。なぜ, 眉をひそめたり, いつまでも古くて新しい方法であるのかを始めに考える。一方, 原波形解析やモーメントテンソル解析, 縦波振幅の3次元放射パターンといった新しい定量的な信号処理が最近なされ, 本当に知りたい情報, 例えば, エロージョンにおける衝撃力とか, 環境劣化割れにおける破壊源の位置, 破壊速度, 破壊面積, 開口変位量などが推定できるようになってきた。ここでは, 従来型 AEの問題点, 新しい信号処理法の紹介とこれを用いることによって何が明らかにできるかを紹介する。

2. 従来型 AE法

従来型と書いたが, 現在でも使われており, これはこれで結構有用な情報が得られる。特に最近では, 高性能電子機器や人口知能的機能のインストールにともない, リアルタイムの音源位置評定, 検出波に関する各種パラメータ, 例えば, 振幅, AEヒット数, 累積数, エネルギー, 周波数スペクトラムなどが専門的知識がなくても得られるようになっている。多くの場合, AEヒット数やエネルギーの経時変化(経時変化に伴う応力や歪との対応)がモニターされ, 例えば水素脆性割れに適用した場合, 割れの発生場所や進展をモニターできる。しかし, この種の装置では, 信号と雑音を区別しにくいという問題がある。雑音を除去するために, しきい値(スレッショールド)や周波数フィルターを設置するが, しきい値より大きなノイズが入ってくることは頻繁にあることだし, 周波数フィルターを使えば大事な情報を取り落とす危険性がある。また, 設定条件をかえれば, 情報量や質も変わり, あくまで相対評価の域を出られない。第二の問題は, “割れが進展しつつあるようだ”という程度の情報で, 例えば最も知れた

* 青山学院大学 理工学部 (〒157 東京都世田谷区千歳台 6-16-1)
Fac. of Sci. and Eng., Aoyama Gakuin Univ. (16-1,
Chitosedai 6-chome, Setagaya-ku, Tokyo 157)

い“一つ一つの割れが、どのくらい大きく、早く、どんな割れ方（破壊モード）をしているのか？”といった情報が得にくい。もっとも、AE振幅が大きくなればかなり危なくなってきたということくらいは分かる。縦波の立上がり時間は、亀裂の生成速度を反映することから、これらのパラメータを表示する装置もあるが、破壊のダイナミクスに関する詳細な情報を得るためには、やや面倒な信号処理が必要である。

3. AE原波形解析

AE原波形とは、弾性波発生の原因となった現象の物理量である。いわゆるAEが、弾性波伝播の結果としての振動（一般には振動変位を測っているのは稀で、ほとんどの場合歪められた波形）を見ているのに対し、原波形解析とは結果としての振動からその原因を求める方法で逆問題の一つである¹⁾。このような信号処理が可能になったのは、弾性波動論にもとづいた定量的解析法、コンピュータや計算アルゴリズムの発達に負うところが多い。原波形解析の口火を切ったのは、変位センサーの開発にあると言っても良からう。すなわち、元NBSのF. R. Breckenridgeら²⁾は、1974年に静電容量型変位センサーを開発し、ガラスキャピラリーを圧壊したときの媒体の振動(変位)を正確に計測し、理論的に計算される変位と極めてよく一致すること、原波形はステップ状の力の解放であること(モノポール源)であることを示した。同じ頃、H. N. Mooney³⁾やL. R. Johnson⁴⁾によって等方弾性体の応答関数(グリーン関数)の解析解が与えられている。L. R. Johnsonは、地球物理の専門家で地震問題を扱っている。すなわち、AEによる振動は地震における揺れ、AE原波形解析やモーメントテンソル解析は震源のマグニチュードやサイズミックモーメントを求めることにほかならない。地震の場合、面内(東西、南北方向)あるいは面外(上下方向)変位がかなり正確に計測されるが、AEによる振動は極めて高速かつ微弱であることから計測がかなり難しい。しかし、表面変位を測ることの重要さは(1)式をみれば明らかである。今、媒体内の場所 x' 、時間 t' で、

外力 $F(x', t')$ 及び亀裂の発生(その体積を $V(x', t')$ 、ダイポール源)があったとき、時間 t 、場所 x における x_i 方向の変位 $U_i(x, t)$ は、畳込み積分(記号*)で与えられる。

$$U_i(x, t) = G_{ik}(x, t; x', t') * F_k(x', t') + T_{ij}(x, t; x', t') * V_k(x', t') \cdots (1)$$

G_{ij} 、 T_{ij} は第一種および第二種グリーン関数で、音源とセンサー位置、媒体の音響特性が分かれば計算できる。もし、変位を正確に計測できれば、原波形は(1)式の逆畳込み積分、または原波形を仮定し繰り返して計算すれば(シミュレーション法)、亀裂体積の生成速度と破壊モードが分かる。Wadlyら⁵⁾、岸ら⁶⁾、M. Ohstuら^{7)~10)}は、精力的な研究を行い新しいAE解析の基礎を確立した。しかし、微弱な変位を計測することは必ずしも容易でない。センサーが変位を計測できても、モニタリング装置が波形歪を与えれば何にもならない。筆者らは、この分野では後発の方であるが、変位センサーと波形歪をほとんど与えない広帯域前置増幅器、高速ディジタイザーが市場にあったことから、これらを寄せ集めて微小変位(通常 10^{-14} m程度)の計測と信号処理ができるシステムを独自に構築した。このシステムを用いて、モノポールやダイポール現象を計測した例を紹介する。

4. 水撃圧の計測^{11), 12)}

超音速液滴の衝突による材料損傷は、レイノルズ数と呼ばれ水撃圧が原因である。水撃圧は、極めて短時間のインパルス力であると言われているが、これを正確に測った研究はない。開発システムを用いても周波数帯域に制限があることから、小さな液滴径の水撃圧を測ることは今でも難しいが、大きな液滴(直径2.3mm)のそれは計測できる。図1は、液滴衝突面と同一面で検出した変位と逆演算によって求めた水撃圧である。検出波はインパルス力が作用した時の理論表面変位と一致し、縦波(P)、やや不明瞭な横波(S)、レイリー波(R)が観察される。水撃圧(原波形)は、式(1)の第1項を使い、周波数領域で求めている。すなわち、第1項は、FFTによって次式に書き換えられ、 $F(t)$ は $F(\omega)$ の逆フーリエ変換で求まる。

$F(\omega)=U(\omega)/G(\omega)$ (2)

1500Nにも達する水撃圧が求まっている。固形粒子が衝突したときの衝撃力は、もっとゆっくりした現象で、同様の方法で簡単に求まる。

5. 高張力鋼の水素脆性割れ^{(4), (5)}

図2に示すようなCT試験片に発生する水素脆化割れの原波形解析を行った。試験片には、たくさんセンサーがついているが、原波形解析で大事なセンサーは#7の変位センサーで、負荷方向変

位 $U_3(x, t)$ を測る。そのほかのセンサーは、音源位置評定とモーメントテンソル解析のためのものである。この試験片にカソード水素チャージしながら負荷を与えると、膨大な数のAE波が観察されるが、その一例を図3(B)に示す。一方、波(A)はモードI（亀裂面法線方向が負荷方向）割れの発生に対して計算したセンサー位置の面外変位 $U_3(x, t)$ である。いま、亀裂体積 ΔV が ΔTr の時間内に発生しその成長が停止したとすれば、原

図1 高速液滴の衝突によるAE検出変位と逆演算によって求めた水撃圧（原波形）

図3 劈開型破壊に対するシミュレーション変位と検出波の比較（低合金鋼の水素脆性割れ）

図2 開発システムを用いたCT型低合金鋼の水素脆性割れの検出

波形は図4に示すようなステップ状の関数になることから、関数 $V(x', t')$ を仮定すれば変位は式(3)で計算できる。

$$U_3(x, t) = T_{33}(x, t; x', t') * V(x', t')$$

.....(3)

図3(A)の変位は、 $\Delta T_r = 1 \mu s$ 、 $\Delta V = 10^{-14} m^3$ の原波形に対して計算したものであるが、初動波は(B)とよく似ている。亀裂体積は亀裂面積 ΔA と開口変位 b_k の積として与えられることから、円盤状の亀裂 ($b_k = 1 \mu m$) を仮定すれば、P波振幅は、直径約 $25 \mu m$ の亀裂が $1 \mu s$ で発生したことになる。

系（媒体とモニタリングシステム）を一括した応答関数が求められれば、周波数領域での原波形解析も不可能ではないが、解は発散しやすくなかなか容易ではない。

開発した方法で、鋭敏化ステンレス鋼304のトトラチオン酸やフッ化物溶液中での割れをモニターした。これら系では、数は少ないものの、SCC進展速度（通常 $10^{-7} m/s$ 程度）の約 10^9 倍にも達する高速劈開破壊が発生することなども分かっている^{16), 17)}。環境劣化割れの中には、応力腐食割れなのか水素脆性割れなのか、そのメカニズムの不明な系もあるがこれを解明できる可能性を持っている。

6. モーメントテンソル解析による破壊のキネマティクス^{18)~20)}

上に述べた解析では、破壊モードと亀裂面を仮定してグリーン関数を計算している。しかし、小さな割れは、図5に示すように傾いていることが多い。モーメントテンソル解析を行えば、亀裂面法線方向 n や変位の食違い方向 l 、破壊モード（せん断破壊の寄与率）など割れのキネマティクスを求めることも可能である。このためには、やや面倒な信号処理、最低でも6個のセンサーを用いた計測（変位を計測する必要はない）、センサーの較正などが必要になる。詳しくは文献15, 18, 19, 20を参照されたいが、方法の概要と水素脆性割れに適用した結果を紹介する。(1)式の第2項を割れの方

図4 突発的割れ発生の原波形

図5 モーメントテンソル解析によって同定できる亀裂の幾何学的諸量

て書き換えると、(4)式になる。
$$T_{ik} \cdot b_k = (\lambda G_{ij, j} n_k + \mu G_{ik, j} n_j + \mu G_{ij, k} n_j) b_k = G_{ip, p} \cdot m_{pq} \dots\dots\dots(4)$$
ここで、 λ 、 μ はラーメの定数、 m_{pq} はモーメントテンソルで割れの方

向に関する情報を持ち、(5)式で与えられる。
$$m_{pq} = \lambda b_k l_{ik} \delta_{pq} + \mu b_p l_{iq} + \mu b_q l_{ip} \dots\dots\dots(5)$$
(5)式は、2階のテンソルであるから、最低6個のセンサーを用いて縦波の大きさを計測すれば、固有値解析を行うことによってテンサー成分を求め、亀裂に関する角度： θ 、 ξ 、 ϕ をすべて求めることができる。図6は低合金鋼の水素脆化割れの先端に発生した傾いた亀裂の一例（下）とすべての割れの ϕ と θ 分布（上）である。推定した ϕ は写真の各亀裂に対応して19から46となっており観察結果とよく一致している。また、これらの

結果から、純粋劈開破壊 ($\theta, \phi = 0$) はほとんどなく、せん断破壊が20-40%程度寄与していることも分かった。傾いた亀裂に対するグリーン関数も計算できることから、変位も同時計測すれば割れ生成速度も解析できる。図5に見られるような微小亀裂は、約200m/sから400m/sの速度で発生していることまで分かっている。すなわち、原波形とテンソル解析を併用すれば、“何処でどんな破壊がどの位の速度で生成しているか”，亀裂について知りたい情報はほとんど全部分かることになる。

7. 縦波振幅の3次元放射パターン解析による薄膜強度の評価²¹⁾

各種気相蒸着セラミックス膜が耐環境膜として用いられているが、これらの薄膜では破壊モードと音源が制限されることから、4個程度の高感度センサーで初動縦波の3次元振幅値分布を調べれば破壊モードが分かる。図7はホローカソードPVDでステンレス上に堆積したTiN膜の圧縮負荷中に発生した膜/基材界面のモードI型破壊の振幅分布で、解析的に求まる放射振幅軌跡とよく一致している。TiN皮膜は、図8に示すように、(a)表面突沸粒子外周に沿う弾性範囲内での縦方

図6 水素脆性割れ先端に見られる傾いた微小亀裂と検出AEはすべてについて解析した傾斜角度
傾斜角度は白ぬき丸か黒丸のどちらかをとる。

図7 縦波振幅の3次元放射パターン解析による気相蒸着TiN膜の破壊モード

図8 放射パターン解析によって明らかにされたホローカソード気相蒸着 TiN皮膜の破壊強度と破壊様式

向モードⅠ型破壊→(b)塑性域における界面でのモードⅠ型破壊→(c)基材すべりに伴う皮膜破壊の順に発生し、破壊発生応力とそのモードが追跡できる。この皮膜では、界面に沿うせん断型はく離（モードⅡ）は起こらないことも分かった。

8. おわりに

AEの最近の動向について著者らの研究を中心に紹介した。原波形解析やモーメントテンサー解析などの信号処理を行えば、環境劣化割れに関するほとんどすべての情報を得ることが可能である。これらの方法を用いるためには、やや特殊なセンサーやモニタリング装置、信号処理が必要であるが、“何かが起こっているらしい”といった不満足な情報ではなく、現象の本質に迫ることも可能になりつつある。市販AE装置で計測される情報に、ここで述べたような信号処理法を追加して、高付加価値情報にすることなども可能と思われる現在検討中である。

(1994-7-1 受理)

文 献

- 1) 岸 輝雄；材料，29，765 (1980)
- 2) F. R. Breckenridge and M. Greenspan；*J. Acoustic Soc. Am.*，68，117 7 (1981)
- 3) H. M. Mooney；*J. Phys D. Appl. Phys.*，12，1309 (1979)
- 4) L. R. Johnson；*Bull. Seism. Soc., Am.*，64，373 (1974)
- 5) H. N. G. Wadly and C. B. Scruby；*Advances in Acoustic Emission*, p.12 5 (Dunhart Pub., 1981)
- 6) 大平貴規，岸 輝雄；日本金属学会誌，46，518 (1982)
- 7) M. Ohtsu；*Material Evaluation*，45，1070 (1987)
- 8) 大津政康；材料，36，111 (1987)
- 9) 大津政康；材料，36，1025 (1987)
- 10) 大津政康；アコースティックエミッションの特性と理論（森北出版，1988）
- 11) 林 泰久，竹本幹男；材料科学，27，231 (1990)
- 12) 林 泰久，竹本幹男；材料科学，28，47 (1990)
- 13) 林 泰久，竹本幹男；防食技術，39，347 (1990)
- 14) 林 泰久，竹本幹男；材料と環境，40，478 (1991)
- 15) Y. Hayasi, M. Takemoto and M. Takemoto；CORROSION'94, Paper. 220 (NACE, 1994)
- 16) 竹本幹男，竹本 誠，林 泰久，中沢知之；腐食防食'93, p.329 (1994)
- 17) N. Nakazawa and M. Takemoto；*Proc. Asian Symp. Corrosion and Protection*, p.469 (The Society of Materials Science Japan, 1994)
- 18) 大津政康；材料，36，1025 (1987)
- 19) 大津政康，重石光弘，湯山茂徳，岡本享久；非破壊検査，42，570 (1993)
- 20) 竹本 誠，林 泰久，竹本幹男；材料と環境，印刷中
- 21) 小川真吾，深井利嗣，竹本幹男；材料と環境，投稿中